

# Optimisasi Parameter *Interline Power Flow Controller* (IPFC) menggunakan *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA)

Muhammad Siddiq B., Sidaryanto, Imam Robandi

Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: robandi@ee.its.ac.id

**Abstrak**— *Interline Power Flow Controller* (IPFC) merupakan alat kendali daya aktif dan reaktif antara beberapa saluran dengan mentransfer daya dari saluran yang mengalami kelebihan beban (*overload*) ke saluran yang kekurangan beban (*underload*). IPFC menggunakan dua buah *Voltage Sourced Converters* (VSCs) yang dihubungkan dengan saluran DC (*DC link*). Pada penelitian ini dilakukan optimisasi parameter pada IPFC dengan menggunakan *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA) berdasarkan model *steady state* untuk meminimalkan rugi-rugi transmisi pada jaring. Simulasi yang dilakukan adalah penerapan optimisasi parameter IPFC dengan menggunakan ICA pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV. Pada simulasi tersebut dibandingkan antara kinerja sistem tanpa IPFC, sistem dengan IPFC tapi tanpa optimisasi, dan dengan sistem yang menggunakan IPFC yang telah dioptimisasi dengan menggunakan ICA. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan ICA pada optimisasi parameter IPFC dapat meminimalkan rugi-rugi transmisi pada jaringan.

**Kata Kunci**— IPFC, ICA, *power flow*, VSC

## I. PENDAHULUAN

UNTUK memenuhi peningkatan kebutuhan daya listrik atau alasan lain, aliran daya pada jaring transmisi seringkali melebihi batas kapasitas. Pembangunan jaring transmisi baru dapat menjadi solusi masalah tersebut, namun solusi tersebut membutuhkan biaya yang mahal dan kadang mendapatkan hambatan seperti faktor lingkungan dan faktor sosial. Untuk itu penggunaan peralatan FACTS (*Flexible AC Transmission System*) menjadi solusi yang baik untuk mengatasi masalah tersebut [1].

Peralatan FACTS banyak digunakan sebagai pengendali injeksi daya. Pengendali tersebut digunakan untuk meningkatkan respon transien dan juga mengendalikan aliran daya aktif dan reaktif pada sistem. *Interline Power Flow Controller* (IPFC) merupakan salah satu peralatan FACTS dengan kemampuan yang unik [2].

IPFC yang diperkenalkan pertama kali oleh Laszlo Gyugyi, merupakan alat kendali daya aktif dan reaktif diantara beberapa saluran dengan mentransfer daya dari saluran yang mengalami kelebihan beban (*overload*) ke saluran yang kekurangan beban (*underload*) [1]. IPFC juga dapat mengkompensasi drop tegangan reaktif, menyamakan daya reaktif jaring, dan meningkatkan keefektifan kompensasi sistem terhadap gangguan yang dinamis. IPFC dapat mengendalikan tegangan, daya aktif, dan daya reaktif yang mengalir pada masing-masing saluran [3].

IPFC menggunakan dua buah *Voltage Sourced Converters* (VSCs) yang dihubungkan dengan saluran DC dan masing-masing converter memberikan kompensasi seri pada saluran yang dipilih pada sistem transmisi. Dengan menggunakan saluran DC, inverter apa pun pada IPFC memungkinkan untuk mentransfer daya ke jaring lain dan dengan demikian memfasilitasi transfer daya diantara saluran [4].

IPFC dihubungkan ke saluran tertentu untuk menyuntikkan tegangan dengan besaran dan sudut fasa yang terkontrol. Untuk menganalisa aliran daya pada sistem transmisi tersebut dibutuhkan sebuah algoritma *Optimal Power Flow* (OPF) pada saat IPFC dihubungkan [5]. Oleh sebab itu diperlukan sebuah algoritma dalam penentuan parameter pada IPFC dalam mencapai kondisi aliran daya yang optimal. Sasaran optimisasi tersebut adalah meminimalkan rugi-rugi jaring transmisi yang disimulasikan pada sistem kelistrikan Jawa Bali.

Pada penelitian ini, digunakan metode optimisasi *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA) untuk menentukan parameter yang paling optimal pada IPFC untuk mereduksi rugi-rugi daya pada jaring transmisi listrik. Jaring transmisi yang digunakan adalah pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV. Hasil simulasi menunjukkan perbandingan rugi-rugi daya pada sistem kelistrikan tanpa IPFC, sistem kelistrikan dengan IPFC, dan sistem kelistrikan dengan IPFC yang parameternya dioptimisasi dengan menggunakan ICA.

## II. PEMODELAN DAN ALGORITMA

### A. *Interline Power Flow Controller* (IPFC)

IPFC diperkenalkan pertama kali oleh Laszlo Gyugyi [1]. IPFC merupakan salah satu contoh FACTS device dengan kemampuan manajemen power flow diantara multi-line pada jaring listrik. Seperti yang terlihat pada Gambar 1, IPFC menggunakan dua buah *Voltage Sourced Converters* (VSCs) yang dihubungkan dengan *DC link* dan masing-masing converter memberikan kompensasi seri pada saluran yang dipilih pada sistem transmisi.

Dengan *DC link* tersebut memungkinkan IPFC untuk mentransfer daya aktif dan daya reaktif pada multi-line tersebut dengan mentransfer daya dari saluran yang mengalami kelebihan beban (*overload*) ke saluran yang kekurangan beban (*underload*) [6]. Transfer daya tersebut dilakukan dengan mengatur besar tegangan magnitude dan sudut fasa pada masing-masing VSC [4]. IPFC juga dapat mengkompensasi drop tegangan reaktif, menyamakan daya reaktif jaring, dan meningkatkan keefektifan kompensasi

sistem terhadap gangguan yang dinamis [2].

Pemodelan IPFC ini diperoleh dari pemodelan injeksi daya pada IPFC. Model ini digunakan sebagai studi pengaruh IPFC pada sistem jaring listrik dengan menggabungkan dengan algoritma aliran daya.

Pada analisa steady state pada sistem kelistrikan, VSC digambarkan sebagai sebuah sumber tegangan sinkron yang menginjeksikan tegangan hampir sinusoida dengan besaran magnitude dan sudut fasa yang dapat diatur [7]. Berdasarkan karakteristik tersebut, rangkaian ekuivalen pada IPFC diperlihatkan pada Gambar 2.5.

Pada Gambar 2,  $V_i$ ,  $V_j$ , dan  $V_k$  merupakan tegangan bus kompleks pada bus  $i$ ,  $j$ , dan  $k$  secara berturut-turut, didefinisikan sebagai  $V_m \angle \theta_m$  ( $m = i, j$ , dan  $k$ ).  $V_{seij}$  dan  $V_{seik}$  merupakan tegangan kompleks yang dapat diatur pada SVC, didefinisikan sebagai  $V_{sein} \angle \theta_{sein}$  ( $n = j, k$ ).  $Z_{seij}$  dan  $Z_{seik}$  merupakan impedansi seri pada transformer. Pemodelan injeksi daya diperoleh dari penggantian sumber tegangan ( $V_{sein}$ ) sebagai sumber arus ( $I_{sein}$ ) secara paralel dengan jaring transmisi. Untuk penyederhanaan, nilai resistansi pada jaring transmisi dan transformer yang dipasang seri diabaikan [7].

Kemudiar sumber arus dinyatakan sebagai berikut.

$$I_{sein} = -jX_{sein}V_{sein} \quad (1)$$

Sekarang sumber arus ( $I_{sein}$ ) dapat dimodelkan sebagai daya yang diinjeksikan pada bus  $i$ ,  $j$ , dan  $k$ . Daya kompleks yang diinjeksikan pada bus ke- $i$  sebagai berikut[7].

$$S_{inj,i} = \sum_{n=j,k} V_i(-I_{sein})^* \quad (2)$$

Substitusi (1) ke (2).

$$S_{inj,i} = \sum_{n=j,k} V_i(jX_{sein}V_{sein})^* \quad (3)$$

Setelah penyederhanaan, daya injeksi aktif dan reaktif pada bus ke- $i$  adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_{inj,i} &= \text{Re}(S_{inj,i}) \\ P_{inj,i} &= \sum_{n=j,k} (V_i V_{sein} X_{sein} \sin(\theta_i - \theta_{sein})) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Q_{inj,i} &= \text{Im}(S_{inj,i}) \\ Q_{inj,i} &= -\sum_{n=j,k} (V_i V_{sein} X_{sein} \cos(\theta_i - \theta_{sein})) \end{aligned} \quad (5)$$

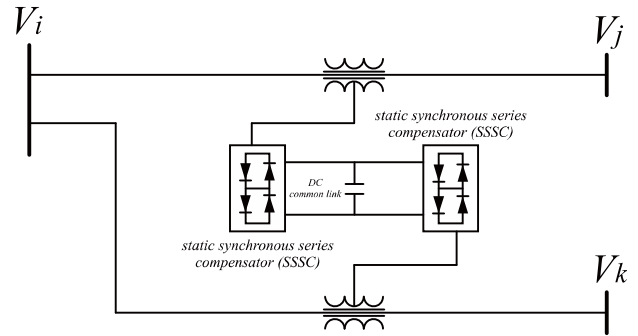
Daya kompleks yang diinjeksikan pada bus nth ( $n = j, k$ ) adalah sebagai berikut.

$$S_{inj,i} = V_n(I_{sein})^* \quad (6)$$

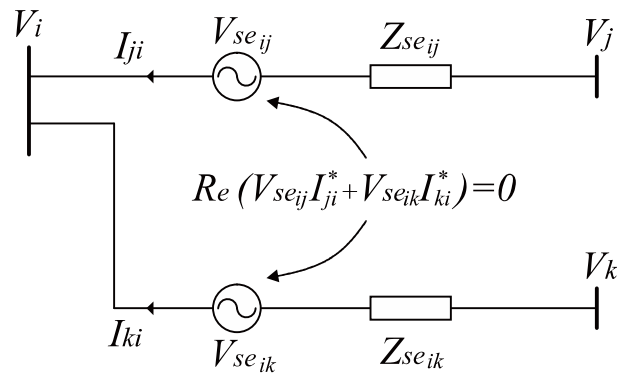
Substitusi (1) pada persamaan (6)

$$S_{inj,i} = V_n(-jX_{sein}V_{sein})^* \quad (7)$$

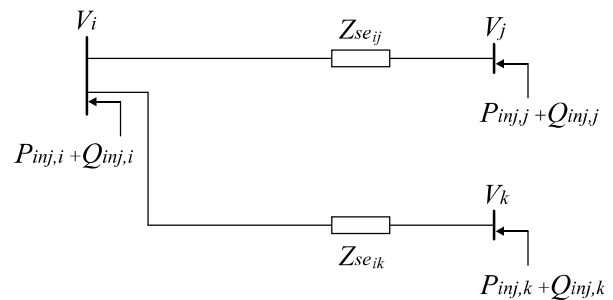
Setelah penyederhanaan, daya injeksi aktif dan reaktif pada



Gambar. 1. Diagram Skematik IPFC.



Gambar. 2. Rangkaian Ekuivalen pada Converter IPFC.



Gambar. 3. Model Injeksi Daya pada IPFC.

bus ke- $i$  adalah sebagai berikut [7].

$$\begin{aligned} P_{inj,i} &= \text{Re}(S_{inj,i}) \\ P_{inj,i} &= -V_n V_{sein} X_{sein} \sin(\theta_n - \theta_{sein}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q_{inj,i} &= \text{Im}(S_{inj,i}) \\ Q_{inj,i} &= V_n V_{sein} X_{sein} \cos(\theta_n - \theta_{sein}) \end{aligned} \quad (9)$$

Dari persamaan (4), (5), (8), dan (9), model injeksi daya pada IPFC dapat digambarkan sebagai tiga daya injeksi yang ada pada masing-masing bus  $i$ ,  $j$ , dan  $k$  seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.

IPFC tidak menyerap dan menginjeksikan daya aktif terhadap sistem AC, sehingga pertukaran daya diantara converter melalui DC link adalah nol.

$$\text{Re}(V_{seij} I_{ji}^* + V_{seik} I_{ki}^*) = 0 \quad (10)$$

Tanda \* dinotasikan sebagai nilai conjugate pada nilai kompleks. Jika resistansi transformer diabaikan, maka persamaan (10) dapat ditulis sebagai berikut.

$$\sum_{m=i,j,k} P_{inj,m} = 0 \quad (11)$$

#### B. Persamaan Keseimbangan Daya dengan IPFC

Model injeksi daya pada IPFC dapat dimasukkan ke dalam algoritma aliran daya Newton Raphson dengan menambahkan daya injeksi ke dalam persamaan keseimbangan daya. Persamaan keseimbangan daya dapat ditulis sebagai berikut [7]:

$$\Delta P_m = \Delta P_m^0 + P_{inj,m} \quad (11)$$

$$\Delta Q_m = \Delta Q_m^0 + Q_{inj,m} \quad (12)$$

Tanda "0" menunjukkan keseimbangan daya tanpa IPFC dan  $m = i, j, k$ .

#### C. Elemen Matriks Jacobian dengan IPFC

Dengan mempertimbangkan pengaruh dari model IPFC maka elemen pada matriks Jacobian perlu dimodifikasi. Modifikasi yang dilakukan pada elemen matriks Jacobian dapat dituliskan sebagai berikut [7].

Modifikasi diagonal dan off-diagonal dari elemen J1 adalah sebagai berikut.

Pada bus  $i$ :

$$J1(i, i) = J1(i, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial \theta_i} \quad (13)$$

$$J1(i, n) = J1(i, n)^0 + \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial \theta_n} \quad (14)$$

$n=j, k$

Pada bus  $j$ :

$$J1(j, j) = J1(j, j)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial \theta_j} \quad (15)$$

$$J1(j, i) = J1(j, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial \theta_i} \quad (16)$$

$$J1(j, k) = J1(j, k)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial \theta_k} \quad (17)$$

Pada bus  $k$ :

$$J1(k, k) = J1(k, k)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial \theta_k} \quad (18)$$

$$J1(k, i) = J1(k, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial \theta_i} \quad (19)$$

$$J1(k, j) = J1(k, j)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial \theta_j} \quad (20)$$

Modifikasi diagonal dan off-diagonal dari elemen J2 adalah sebagai berikut.

$$J2(i, i) = J2(i, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_i} \quad (21)$$

$$J2(i, n) = J2(i, n)^0 + \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_n} \quad (22)$$

Pada bus  $j$ :

$$J2(j, j) = J2(j, j)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_j} \quad (23)$$

$$J2(j, i) = J2(j, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_i} \quad (24)$$

$$J2(j, k) = J2(j, k)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_k} \quad (25)$$

Pada bus  $k$ :

$$J2(k, k) = J2(k, k)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_k} \quad (26)$$

$$J2(k, i) = J2(k, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_i} \quad (27)$$

$$J2(k, j) = J2(k, j)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_j} \quad (28)$$

Modifikasi diagonal dan off-diagonal dari elemen J3 adalah sebagai berikut.

Pada bus  $i$ :

$$J3(i, i) = J3(i, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial \theta_i} \quad (29)$$

$$J3(i, n) = J3(i, n)^0 + \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial \theta_n} \quad (30)$$

Pada bus  $j$ :

$$J3(j, j) = J3(j, j)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial \theta_j} \quad (31)$$

$$J3(j, i) = J3(j, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial \theta_i} \quad (32)$$

$$J3(j, k) = J3(j, k)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial \theta_k} \quad (33)$$

Pada bus  $k$ :

$$J3(k, k) = J3(k, k)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial \theta_k} \quad (34)$$

$$J3(k, i) = J3(k, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial \theta_i} \quad (35)$$

$$J3(k, j) = J3(k, j)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial \theta_j} \quad (36)$$

Modifikasi diagonal dan off-diagonal dari elemen J4 adalah sebagai berikut.

$$J4(i, i) = J4(i, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_i} \quad (37)$$

$$J4(i, n) = J4(i, n)^0 + \frac{\partial P_{inj,i}}{\partial V_n} \quad (38)$$

Pada bus  $j$ :

$$J4(j, j) = J4(j, j)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_j} \quad (39)$$

$$J4(j, i) = J4(j, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_i} \quad (40)$$

$$J4(j, k) = J4(j, k)^0 + \frac{\partial P_{inj,j}}{\partial V_k} \quad (41)$$

Pada bus  $k$ :

$$J4(k, k) = J4(k, k)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_k} \quad (42)$$

$$J4(k, i) = J4(k, i)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_i} \quad (43)$$

$$J4(k, j) = J4(k, j)^0 + \frac{\partial P_{inj,k}}{\partial V_j} \quad (44)$$

#### D. Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

*Imperialist Competitive Algorithm* (ICA) merupakan algoritma evolusioner yang terinspirasi dari kompetisi kekuasaan (*imperialist competitive*) [7]. Algoritma ini diperkenalkan oleh Esmail Atashpaz dan pada tahun 2007. ICA menyimulasikan proses sosial politik dari imperialisme dan kompetisi kekuasaan. Seperti algoritma evolusioner lain ICA dimulai dengan populasi awal. Setiap individu dari populasi disebut dengan negara (*country*). Beberapa negara terbaik dipilih sebagai negara penjajah dan yang lain membentuk koloni yang digunakan oleh penjajah.

Negara imperialis bersama-sama dengan koloni yang

dimiliki membentuk beberapa *empire* (kerajaan). Setelah membentuk *empire* awal, koloni pada setiap *empire* bergerak menuju negara imperialis yang relevan. Pergerakan ini adalah model sederhana dari kebijakan asimilasi yang diberikan oleh negara imperialis.

Total kekuatan dari sebuah *empire* tergantung pada kekuatan dari negara imperialis dan kekuatan dari koloni. Fakta ini dimodelkan dengan mendefinisikan total kekuatan dari sebuah *empire* merupakan kekuatan dari negara imperialis ditambah dengan presentase dari rata-rata kekuatan koloni.

Langkah-langkah utama pada ICA dapat dirangkum dalam pseudo-code berikut.

1. Pilih titik random pada fungsi dan inialisasi *empire*.
2. Gerakkan koloni menuju imperialis yang relevan (asimilasi)
3. Secara random, ubahlah posisi dari beberapa koloni (revolusi)
4. Jika ada sebuah koloni yang memiliki *cost* lebih baik daripada imperialis, ubahlah posisi dari koloni tersebut dengan imperialis.
5. Gabungkan *empire* yang sama
6. Hitung total *cost* dari semua *empire*
7. Ambil koloni terlemah dari *empire* terlemah dan berikan kepada salah satu *empire* (Imperialistic competition)
8. Hilangkan *empire* yang paling lemah
9. Jika kondisi berhenti dipenuhi, berhenti, jika tidak, ke langkah 2

Dari langkah-langkah tersebut diharapkan negara-negara untuk bertemu pada global minimum dari *cost function*. Kriteria yang berbeda dapat digunakan untuk menghentikan algoritma. Salah satu yang dapat digunakan adalah maksimum iterasi dari algoritma, yang disebut maksimum dekade. Cara yang lain adalah ketika hanya satu *empire* yang tersisa maka ICA akan berhenti.

### III. OPTIMISASI PARAMETER IPFC MENGGUNAKAN ICA

#### A. Algoritma

Pengerjaan penelitian dimulai dengan melakukan pengumpulan data pembangkitan, beban, dan saluran transmisi pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV. Data yang didapat tersebut dimasukkan ke dalam urutan program (listing program) dalam algoritma. Perhitungan aliran daya dilakukan dalam dua tahap yaitu pada saat sistem dalam keadaan pembebanan 100% dan pada saat sistem dalam keadaan pembebanan 169%.

Besar 169% didapatkan dari nilai beban dinaikkan secara perlahan hingga tegangan dari salah satu bus sistem keluar dari batas yang diijinkan dan kemudian dicatat besar rugi-rugi daya pada tiap-tiap penambahan beban hingga batas maksimum beban tersebut. Batas tegangan bus yang digunakan adalah batas toleransi tegangan bus PLN yaitu -10% dan +5% dari keadaan normal.

Pada masing-masing tahap akan dilakukan tiga simulasi perhitungan aliran daya yaitu simulasi pada sistem keadaan normal tanpa penambahan IPFC, simulasi pada sistem dengan

Tabel 1.  
Parameter ICA

Parameter	Nilai
Number of Countries	200
Number of Initial Imperialists	10
Number of Decades	100
RevolutionRate	0.3
AssimilationCoefficient	2
AssimilationAngleCoefficient	0,5
Zeta	0,02
DampRatio	0,99
UnitingThreshold	0,02

penambahan IPFC, dan pada sistem dengan penambahan IPFC yang telah dioptimisasi dengan menggunakan ICA.

Dari tiga simulasi tersebut akan dibandingkan rugi-rugi daya yang terjadi pada sistem. Hasil perbandingan akan dianalisis dan disimpulkan sebagai kesimpulan penelitian ini.

#### B. Penentuan Parameter IPFC Menggunakan ICA

Untuk menentukan rating IPFC yang optimal, maka digunakan metode ICA. Fungsi objektif yang digunakan untuk permasalahan dalam tugas akhir ini adalah fungsi *power loss of the line* seperti yang ditunjukkan oleh persamaan sebagai berikut.

$$f(x) = aP_{\text{loss of line}} \quad (45)$$

Notasi  $a$  merupakan besarnya objektif minimalisasi rugi-rugi daya sedangkan notasi  $P_{\text{loss of line}}$  merupakan rugi-rugi daya aktif pada satu line transmisi.

Variabel control direpresentasikan dalam vektor  $x$  sebagai berikut:

$$x = [V_{se}, \theta_{se}] \quad (46)$$

Notasi  $V_{se}$  merupakan besar tegangan yang dapat diatur pada SVC dan notasi  $\theta_{se}$  merupakan besar sudut tegangan yang dapat diatur pada SVC.

Pertidaksamaan  $V_{se}$  dan  $\theta_{se}$  dijabarkan sebagai batasan minimum dan maksimum pada  $V_{se}$  dan  $\theta_{se}$ .

$$V_{se_{min}} \leq V_{se} \leq V_{se_{max}} \quad (47)$$

$$\theta_{se_{min}} \leq \theta_{se} \leq \theta_{se_{max}} \quad (48)$$

### IV. SIMULASI DAN ANALISIS

Sistem tenaga listrik Jawa Bali 500 kV terdiri dari 25 bus (tambahan 2 bus baru pada daerah Ngimbang dan Balaraja), dengan 8 unit pembangkit yaitu 2 pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dan 6 dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) [8]. Pada penelitian ini dilakukan pengujian pada sistem saat berada pada puncak beban 100% dan pada pembebanan mencapai 169%.

#### A. Simulasi dan Analisis pada Beban 100%

Dari tiap kondisi beban tersebut masing-masing akan



Tabel 5.  
Hasil Optimisasi Parameter IPFC Menggunakan ICA  
pada Pembebanan 169%

Parameter	Rating
$V_{se_{ij}}$	0,3
$V_{se_{ik}}$	0,3
$\angle se_{ij}$	73,9654
$\angle se_{ik}$	67,5521

dilakukan tiga simulasi yaitu simulasi aliran daya tanpa IPFC, simulasi aliran daya dengan IPFC, dan simulasi aliran daya dengan IPFC yang telah dioptimisasi dengan ICA.

Pada simulasi aliran daya dengan IPFC namun tanpa optimisasi, IPFC tersebut dipasang pada Bus  $i$  = Bus 20, Bus  $j$  = Bus 19, dan Bus  $k$  = Bus 14. Tujuan pemasangan IPFC pada bus tersebut adalah untuk mengurangi rugi-rugi transmisi dari Bus 20 ke Bus 19. Variabel impedansi seri pada transformer  $Z_{se_{ij}}$  dan  $Z_{se_{ik}}$  diasumsikan bernilai  $0,000+j0,010$ [p.u] [6]. Nilai parameter tegangan  $V_{se_{ij}} = 0.25$  p.u dan  $V_{se_{ik}} = 0.25$  p.u. Nilai parameter sudut tegangan  $\angle se_{ij} = -50^\circ$  dan  $\angle se_{ik} = -80^\circ$ .

Pada simulasi aliran daya dengan IPFC yang dioptimisasi menggunakan ICA, IPFC tersebut dipasang pada Bus  $i$  = Bus 20, Bus  $j$  = Bus 19, dan Bus  $k$  = Bus 14. Tujuan pemasangan IPFC pada bus tersebut adalah untuk mengurangi rugi-rugi transmisi dari Bus 20 ke Bus 19. Variabel impedansi seri pada transformer  $Z_{se_{ij}}$  dan  $Z_{se_{ik}}$  diasumsikan bernilai  $0,000+j0,010$ [p.u] [6]. Parameter tegangan  $V_{se_{ij}}$  &  $V_{se_{ik}}$  diberi batasan  $0,001 \leq V_{se} \leq 0,3$ . Parameter sudut tegangan  $\angle se_{ij}$  &  $\angle se_{ik}$  diberi batasan  $-\Pi \leq \angle se \leq \Pi$ . Parameter ICA diperlihatkan pada Tabel 1.

Dari proses optimisasi parameter IPFC menggunakan ICA didapatkan parameter IPFC yang diperlihatkan pada Tabel 2.

Dari tiga simulasi yang dilakukan tersebut dapat dibuat tabel perbandingan rugi-rugi transmisi antara sistem tanpa IPFC, sistem yang menggunakan IPFC, dan sistem yang menggunakan IPFC yang telah dioptimisasi dengan menggunakan ICA seperti yang diperlihatkan pada Tabel 3.

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa rugi-rugi transmisi pada line yang menghubungkan Bus 20 dengan Bus 19 lebih rendah jika sistem tersebut menggunakan IPFC yang telah dioptimisasi dengan ICA daripada sistem tanpa IPFC dan sistem yang menggunakan IPFC tanpa optimisasi. Penurunan rugi-rugi transmisi yang didapatkan jika kita membandingkan sistem yang menggunakan IPFC yang telah dioptimisasi dengan ICA dengan sistem tanpa IPFC adalah sebesar 0,013%. Total rugi-rugi transmisi sistem yang dilengkapi IPFC yang telah dioptimisasi dengan ICA memiliki total rugi-rugi transmisi yang lebih rendah daripada sistem tanpa IPFC yaitu lebih besar 1,995 MW atau sebesar 0,007%.

#### B. Simulasi dan Analisis pada Beban 169%

Dari tiap kondisi beban tersebut masing-masing akan dilakukan tiga simulasi yaitu simulasi aliran daya tanpa IPFC, simulasi aliran daya dengan IPFC, dan simulasi aliran daya dengan IPFC yang telah dioptimisasi dengan ICA.

Pada simulasi aliran daya dengan IPFC namun tanpa

optimisasi, IPFC tersebut dipasang pada Bus  $i$  = Bus 20, Bus  $j$  = Bus 19, dan Bus  $k$  = Bus 14. Tujuan pemasangan IPFC pada bus tersebut adalah untuk mengurangi rugi-rugi transmisi dari Bus 7 ke Bus 5 sehingga mampu menaikkan profil tegangan bus 5 yang berada di bawah batas toleransi. Variabel impedansi seri pada transformer  $Z_{se_{ij}}$  dan  $Z_{se_{ik}}$  diasumsikan bernilai  $0,000+j0,010$ [p.u] [6]. Nilai parameter tegangan  $V_{se_{ij}} = 0.3$  p.u dan  $V_{se_{ik}} = 0.3$  p.u. Nilai parameter sudut tegangan  $\angle se_{ij} = -90^\circ$  dan  $\angle se_{ik} = 180^\circ$ .

Pada simulasi aliran daya dengan IPFC yang dioptimisasi menggunakan ICA, IPFC tersebut dipasang pada Bus  $i$  = Bus 20, Bus  $j$  = Bus 19, dan Bus  $k$  = Bus 14. Tujuan pemasangan IPFC pada bus tersebut adalah untuk mengurangi rugi-rugi

Tabel 2.  
Hasil Optimisasi Parameter IPFC Menggunakan ICA  
pada Pembebanan 100%

Parameter	Rating
$V_{se_{ij}}$	0,3
$V_{se_{ik}}$	0,3
$\angle se_{ij}$	-55,3862
$\angle se_{ik}$	-80,6309

Tabel 3.  
Perbandingan Rugi-Rugi Transmisi Sistem tanpa IPFC, Sistem dengan IPFC,  
dan Sistem dengan IPFC yang dioptimisasi dengan ICA

Parameter	Tanpa IPFC	Dengan IPFC	Dengan IPFC + ICA
Rugi-Rugi Transmisi pada line 20-19 (MW)	26,767	26,509	26,404
Total Rugi-Rugi Transmisi Sistem (MW)	273,349	272,548	271,354

Tabel 4.  
Parameter ICA

Parameter	Nilai
Number of Countries	500
Number of Initial Imperialists	10
Number of Decades	100
RevolutionRate	0.3
AssimilationCoefficient	2
AssimilationAngleCoefficient	0.5
Zeta	0,02
DampRatio	0,99
UnitingThreshold	0,02

transmisi dari Bus 7 ke Bus 5 sehingga mampu menaikkan profil tegangan bus 5 yang berada di bawah batas toleransi. Variabel Variabel impedansi seri pada transformer  $Z_{se_{ij}}$  dan  $Z_{se_{ik}}$  diasumsikan bernilai  $0,000+j0,010$ [p.u] [6]. Parameter tegangan  $V_{se_{ij}}$  &  $V_{se_{ik}}$  diberi batasan  $0,001 \leq V_{se} \leq 0,3$ . Parameter sudut tegangan  $\angle se_{ij}$  &  $\angle se_{ik}$  diberi batasan  $-\Pi \leq \angle se \leq \Pi$ . Parameter ICA diperlihatkan pada Tabel 4.

Dari proses optimisasi parameter IPFC menggunakan ICA didapatkan parameter IPFC yang diperlihatkan pada tabel 5.

Dari tiga simulasi yang dilakukan tersebut dapat dibuat tabel perbandingan rugi-rugi transmisi antara sistem tanpa

IPFC, sistem menggunakan IPFC, dan sistem yang menggunakan IPFC yang telah dioptimisasi dengan menggunakan ICA seperti yang diperlihatkan pada tabel 6.

Dari Tabel 6 dapat dilihat bahwa rugi-rugi transmisi pada *line* yang menghubungkan Bus 7 dengan Bus 5 lebih rendah jika sistem tersebut menggunakan IPFC yang telah dioptimisasi dengan ICA daripada sistem tanpa IPFC dan sistem yang menggunakan IPFC tanpa optimisasi. Penurunan rugi-rugi transmisi yang didapatkan jika kita membandingkan sistem yang menggunakan IPFC yang telah dioptimisasi

Tabel 6.

Perbandingan Rugi-Rugi Transmisi Sistem tanpa IPFC, Sistem dengan IPFC, dan Sistem dengan IPFC yang dioptimisasi dengan ICA

Parameter	Tanpa IPFC	Dengan IPFC	Dengan IPFC + ICA
Rugi-Rugi Transmisi pada <i>line</i> 7-5 (MW)	21,782	21,761	21,670
Total Rugi-Rugi Transmisi Sistem (MW)	426,354	425,817	425,596

dengan ICA dengan sistem tanpa IPFC adalah sebesar 0,005%. Total rugi-rugi transmisi sistem yang dilengkapi IPFC yang telah dioptimisasi dengan ICA memiliki total rugi-rugi transmisi yang lebih rendah daripada sistem tanpa IPFC yaitu lebih besar 0,758 MW atau sebesar 0,001%.

Perbandingan profil tegangan bus antara sistem tanpa IPFC, sistem yang menggunakan IPFC, dan sistem yang menggunakan IPFC yang telah dioptimisasi dengan menggunakan ICA tidak terlalu signifikan. Pemasangan IPFC tidak terlalu berpengaruh pada peningkatan profil tegangan bus. Harapan pemasangan IPFC untuk meningkatkan tegangan bus 7 yang berada di bawah batas ternyata tidak tercapai.

## V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Pada penelitian ini dilakukan optimisasi parameter IPFC menggunakan ICA untuk meminimalisasi besarnya rugi-rugi daya pada jaringan transmisi. Dari hasil simulasi diperlihatkan bahwa penentuan parameter IPFC dengan optimisasi menggunakan ICA dapat mereduksi besarnya rugi-rugi daya pada jaringan transmisi meskipun besarnya penurunan rugi-rugi daya tersebut tidak terlalu signifikan.

Sebagai pertimbangan untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan optimisasi penempatan IPFC pada sistem untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal. Aspek-aspek lain seperti biaya komponen dan biaya pemasangan juga dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam menggunakan IPFC pada sistem tenaga listrik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang membantu dalam penyelesaian penelitian dan artikel ilmiah ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan laboratorium Power System Operation and Control (PSOC) ITS yang telah banyak membantu penulis.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gyugyi, L., "The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems", IEEE transactions on power delivery, Vol. 14, No. 3, (1999, July).
- [2] Mohamed, K. H., "Optimal Parameters of Interline Power Flow Controller using Particle Swarm Optimization", IEEE, (2010) 978-1-4244-6716-7.
- [3] Zhang, Xiao Ping, "Flexible AC Transmission Systems modeling and control", ISBN-10 3-540-30606-4 Springer Berlin Heidelberg New York (2006).
- [4] Teerathana, S., "An optimal power flow control method of power system using IPFC", Proc. IEEE Region 10 Conf. TENCON 2004, (2004), 343-346.
- [5] Basu, M., "Optimal power flow with FACTS devices using differential evolution", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 30, (2008) 150-156.
- [6] Naresh Babu, A.V., "Mathematical Modelling, Analysis and Effect of Interline Power Flow Controller (IPFC) Parameter in Power Flow Studies", IEEE, (2011), 978-1-4244-7882-8.
- [7] Atashpaz-Gargari, E., "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, (2007) 4661-4667.
- [8] Alfarizy, Frisky, "Penempatan Optimal Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) dan Static Var Compensator (SVC) Menggunakan Quantum Behaved Particle Swarm Optimization (QPSO) Untuk Pembebanan Maksimum", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, (2012).